

*4as Jornadas Luso-Españolas de Ingeniería Eléctrica,
Oporto, Portugal, julio 1995*

PROGRAMACIÓN ÓPTIMA DE TAREAS DE MANTENIMIENTO Y RECONFIGURACIÓN SOBRE REDES DE MEDIA TENSIÓN

**Lluís Ros Giralt *, Tom Creemers *, Jordi Riera *,
Carles Ferrarons **, Josep Roca **, Xavier Corbella ****

*** Institut de Cibernètica (UPC / CSIC)**

**Diagonal, 647, 2ª planta
08028 Barcelona, España
Teléfono: + 34 3 401 66 53
e-mail:{ros,creemers,riera}@ic.upc.es**

**** ENHER, S.A.¹**

**Passeig de Gràcia, 132
08008 Barcelona, España
Teléfono: + 34 3 415 50 00
Fax: + 34 3 415 75 72**

RESUMEN

Una de las tareas a las que se enfrenta periódicamente el personal del centro de dispatching de cualquier compañía eléctrica es la obtención de programas óptimos de mantenimiento sobre su red de distribución. Semanalmente, los ingenieros de planificación deben decidir cómo distribuirán en el calendario todos los descargos previstos y, adicionalmente, de qué manera reconfigurarán la red en cada momento del plan para mantener el servicio al máximo número de abonados posible, sin vulnerar los límites de intensidad máxima en las líneas. En términos de programación matemática el problema se clasifica dentro del tipo NP-completo, lo cual hace difícil su tratamiento por métodos convencionales de búsqueda y optimización. En el presente trabajo se ha desarrollado un sistema para la obtención de tales programas usando técnicas de programación lógica por restricciones. El sistema permite, además, la obtención rápida de planes de reposición de servicio para hacer frente a averías imprevistas.

Palabras clave: planificación de tareas, calendario de descargos, plan de reconfiguración, optimización combinatoria, reconfiguración de redes de distribución, programación lógica por restricciones.

1. Introducción

Semanalmente, en el centro de dispatching de cualquier compañía eléctrica, los *ingenieros de planificación* se enfrentan a un complejo problema: la preparación del *programa de mantenimiento* de la red de distribución. El diseño de tal programa comporta principalmente la resolución de dos subproblemas. En primer lugar es necesario elaborar el *calendario de descargos*. Es decir, dada una lista con todas las actividades de mantenimiento/repación (descargos) a realizar durante la semana siguiente, hay que distribuirlas en el

1. Este proyecto ha sido financiado por ENHER, S.A. (Empresa Nacional Hidroeléctrica del Ribagorzana).

tiempo, indicando para cada una en qué momento se aislará la zona afectada (para poder trabajar en su interior) y cuándo se reconectará a la red. En segundo lugar debe diseñarse el *plan de reconfiguración* óptimo: es decir, hay que decidir cómo se alterará la topología de la red en cada instante del calendario para poder mantener el suministro de energía al máximo número de abonados afectados por la desconexión de tramos de línea y asegurando, además, que en ningún momento se vulneran los límites de intensidad máxima permitida de los distintos tramos de la red. Se desea obtener un plan *óptimo* por lo que a coste de realización se refiere. Por tanto, en la medida de lo posible, se minimizará el número de cambios topológicos necesarios durante el plan de reconfiguración.

1.1. Solución integrada de dos problemas relacionados.

Aún tratándose de dos subproblemas distintos, no son independientes. Como se verá, para encontrar la solución a uno cualquiera de ellos es necesario tener en cuenta el espacio de soluciones del otro y, en consecuencia, es adecuado plantear la resolución de ambos en términos de un único problema global de optimización combinatoria. A continuación se exponen las variables que en él intervienen, las restricciones que delimitan su espacio de búsqueda y la función de coste que se considera.

1.2. Variables

Para definir unívocamente un programa de mantenimiento, se utilizan tres tipos de variables: variables *temporales*, variables *topológicas* y variables *eléctricas*.

Las variables temporales definen el aspecto del calendario de descargos. Representan los instantes de inicio y final de cada una de las tareas de mantenimiento que hay que programar. Sus valores varían entre 1 y el número de intervalos temporales con los que se quiera discretizar la semana. Actualmente, y de acuerdo con la política presente de *ENHER S.A.*, se considera una semana de cinco días laborales subdividida en 15 intervalos de tiempo disponibles para fijar los instantes iniciales y finales de las distintas tareas.

Las variables topológicas se utilizan para caracterizar los estados de todos los interruptores de la red en cada intervalo temporal del plan de reconfiguración. El estado de un interruptor puede ser 0 (abierto) o 1 (cerrado). La evolución topológica de la red a lo largo de la semana laboral viene definida por los valores de estas variables binarias.

Las variables eléctricas son las intensidades de corriente que circulan por las distintos tramos e interruptores de la red. Como se verá, aunque para definir de forma no ambigua un programa de mantenimiento particular estrictamente sólo son necesarios los dos tipos anteriores de variables, la incorporación de éstas últimas permite restringir el valor de las anteriores gracias a la existencia de múltiples restricciones que las relacionan.

1.3. Restricciones

Entre las tres categorías de variables anteriores existen varias restricciones que limitan el dominio de validez de cada una de ellas (figura 1).

- *Restricciones de aislamiento.* Son las más importantes. Interrelacionan (y restringen) los tres grupos de variables anteriores. Expresan el requerimiento de que, por cuestiones de seguridad, el área de trabajo de cada descarga debe quedar aislada durante la realización de éste. Durante este período de tiempo, los interruptores circundantes que la aíslan deben tener el estado “abierto”.
- *Restricciones de suministro.* Relacionan variables temporales con variables eléctricas: en ningún instante del calendario de descargos se tolera el corte de suministro eléctrico a ningún usuario. Por tanto, para cada nodo consumidor hay que obligar a que la intensidad de corriente recibida sea mayor que cero durante toda la semana. Hay una excepción a esta regla: en aquellos consumidores afectados por la realización de un descarga situado aguas arriba y sin posibilidad de recibir suminis-

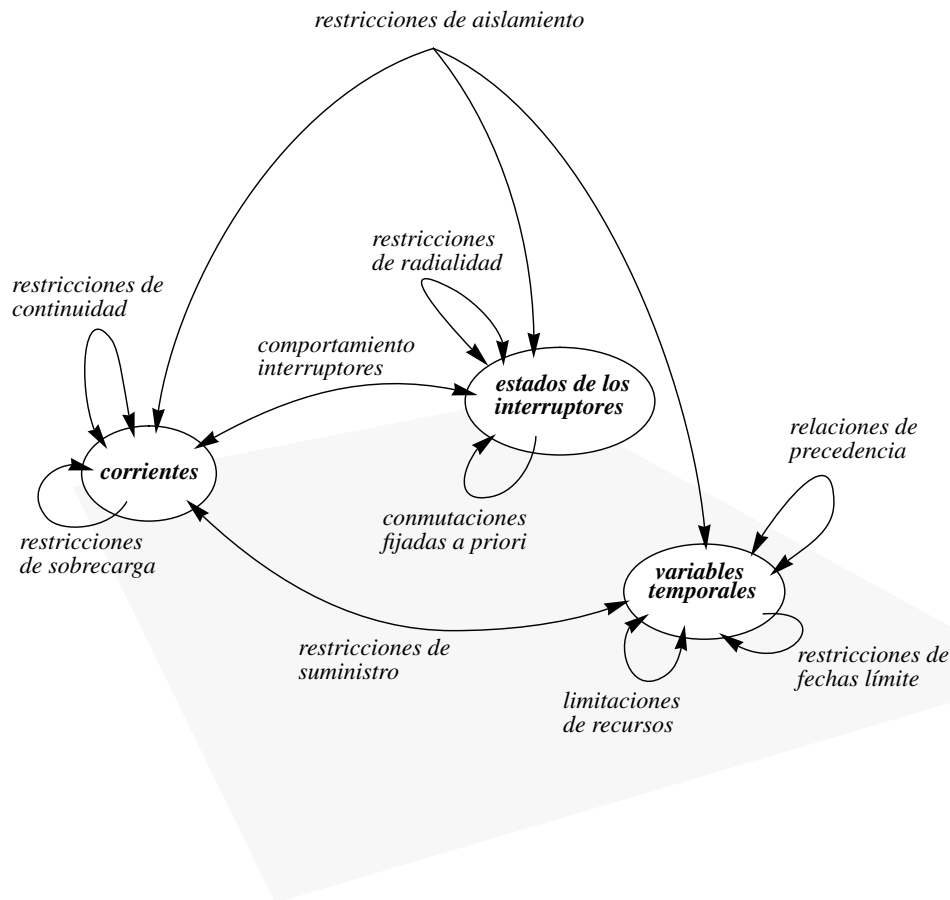


Figura 1 - Red de variables y restricciones.

tro por algún camino alternativo, se permite que la intensidad sea cero durante el intervalo de tiempo que se tarda en finalizar la mencionada tarea.

- *Comportamiento de los interruptores.* Estas restricciones relacionan el estado S de un interruptor con su intensidad de corriente circulante. Expresan dos restricciones condicionales:

$$\begin{aligned} \text{si } |I| > 0 \text{ entonces } S &= 1, \text{ y} \\ \text{si } S &= 0 \text{ entonces } I = 0. \end{aligned}$$

Las tres categorías anteriores de restricciones son las más relevantes. Como se ilustra en la figura 1, su existencia reduce implícitamente el espacio de posibles soluciones tanto del calendario de descargos como el del plan de reconfiguración asociado. Ello justifica la unificación de ambos subproblemas arriba anunciada.

Existen otras limitaciones a tener en cuenta que involucran a variables de un solo tipo:

- Las intensidades de corriente circulando por las distintas ramas de la red deben satisfacer la *ley de continuidad* de Kirchoff: la suma de todas las intensidades inyectadas en un nodo debe ser cero.
- *Restricciones de radialidad.* La política de explotación típica de una red de distribución obliga a

que todas las topologías por las que evoluciona la red a lo largo de la semana sean radiales. Es decir, en ningún momento debe existir ningún bucle cerrado salvo en los instantes en que se efectúa la transición de una topología radial a la siguiente.

- *Relaciones de precedencia.* Tareas que afectan a porciones cercanas a la cabecera de una línea deben finalizar antes que aquellas situadas en ramas terminales situadas aguas abajo de las primeras. Este proceder asegura que las actividades de mantenimiento que potencialmente afectan a más usuarios son acabadas antes, teniendo la red preparada y en las mejores condiciones posibles para hacer frente a cualquier imprevisto.
- *Limitaciones de recursos.* Para la realización de cada descarga hay que utilizar cierta cantidad de recursos: personal técnico, vehículos, generadores móviles, etc. Es preciso evitar combinaciones de descargos simultáneos que consuman, en conjunto, cantidades no disponibles de los mismos.

Finalmente, hay tres restricciones unarias que reducen directamente los dominios de validez de cada grupo de variables:

- *Fechas límite.* Todos los descargos deben haber finalizado antes de su *fecha de final más lejano* (“latest finishing time”), y empezar después de su *fecha de inicio más temprano* (“earliest starting time”). Ambas fechas son establecidas a priori por el operador y permiten restringir la posición de una tarea particular dentro de una determinada horquilla temporal. Adicionalmente, se quiere poder escoger el carácter de estas restricciones, es decir, establecer si actúan como *restricciones duras* (“hard constraints”) o bien como blandas (“soft constraints”). En el primer caso son de obligado cumplimiento. En el segundo se acepta una violación de las mismas a costa de añadir un determinado coste a la función objetivo.
- *Conmutaciones de interruptores fijadas a priori.* El usuario puede fijar el estado de cualquier interruptor en cualquier instante de la semana.
- *Restricciones de sobrecarga.* Nunca se puede sobrepasar la intensidad máxima de ninguna rama.

1.4. Bondad de la solución

Muchas redes de distribución son todavía no telecontroladas. En consecuencia, casi siempre hay que trasladar equipos de personal para efectuar cualquier cambio topológico en ellas. Si la planificación de estos cambios no se hace con cuidado, frecuentemente pueden aparecer operaciones de conmutación que resultan redundantes. Por otro lado, es preciso asegurar que a lo largo del tiempo la topología de la red no se desvía excesivamente de su estructura nominal de diseño.

Para conseguir estos dos objetivos se ha efectuado la minimización de una función que tiene en cuenta dos tipos de coste:

- *Un coste de operación:* cada interruptor tiene un coste asociado que refleja la dificultad de acceder a él y accionarlo.
- *Un coste por cada estado no nominal:* se paga también un precio por cada unidad temporal en la que un interruptor dado está fuera de su estado nominal.

Opcionalmente, en caso de existir alguna restricción de fecha límite considerada como “blanda”, la función objetivo incorpora un término que contabiliza el número de intervalos de tiempo en los que se viola alguna de estas restricciones y añade un coste proporcional.

2. PLANETS: un sistema integrado

La obtención de programas de mantenimiento óptimos es todavía un proceso iterativo y manual para el cual los ingenieros de planificación tienen pocas herramientas de ayuda. Las soluciones propuestas por un humano se basan principalmente en la experiencia acumulada y, lógicamente, distan bastante de ser ópti-

mas como consecuencia de la gran explosión combinatoria del problema, la cual hace incluso difícil su tratamiento por métodos convencionales de investigación operativa. Debido a la considerable componente de satisfacción de restricciones que presenta, se ha preferido abordar su resolución mediante métodos más potentes y flexibles de programación lógica por restricciones. Ello ha dado lugar a un prototipo inicial *PLANETS* (“*PLanning Activities on NETworkS*”) ya probado con éxito sobre un subconjunto de la red de distribución de ENHER.

Hasta el momento actual los autores no tienen noticia de la existencia de ninguna herramienta similar que permita la optimización global tanto del calendario de descargos como del plan de reconfiguración correspondiente. *PLANETS* es además el primer sistema que utiliza técnicas de PLR en el área de reconfiguración de redes eléctricas.

2.1. Programación lógica por restricciones

La aplicación de técnicas de inteligencia artificial a problemas de planificación ha experimentado un auge considerable durante los últimos años. En particular, la reciente metodología de la *programación lógica por restricciones* (PLR) [6] ha demostrado ser muy apropiada para tratar este tipo de problemas *discreto-combinatorios* y, casi siempre, *NP-completos*. El objetivo es siempre el mismo: en un espacio discreto encontrar un punto que satisfaga un conjunto de *restricciones*. La PLR nació con ánimo de reducir el tiempo de desarrollo y aumentar la flexibilidad de las aplicaciones, conservando la misma eficiencia mostrada por implementaciones especializadas. Esto se ha conseguido añadiendo *técnicas de consistencia* [3] a las ya propias de la *programación lógica* (PL) [2] [4]. Gracias al no-determinismo de la PL, el usuario no tiene que preocuparse por el desarrollo de algoritmos de búsqueda. Mientras su forma relacional facilita la expresión de restricciones, su semántica declarativa hace que los programas sean fáciles de modificar y extender. Las técnicas de consistencia utilizan las restricciones de manera activa: se poda el espacio de búsqueda *a priori*, eliminando combinaciones de valores que nunca puedan aparecer juntos en una solución. La búsqueda constituye una iteración de dos pasos, según el esquema siguiente:

repetir

- 1) propagación de restricciones hasta donde sea posible.
- 2) presunción de valores para algunas variables.

hasta que se encuentre un etiquetado consistente completo (de todas las variables)

2.2. Arquitectura e implementación

El núcleo de *PLANETS* (figura 2) es un motor de propagación de restricciones escrito en *CHIP* (V4¹) (*Constraint Handling In Prolog*) [6], un lenguaje de PLR de uso industrial que incorpora, además, algoritmos de optimización basados en los métodos *Símplex* y “*Branch & Bound*” que actúan alrededor de la iteración básica mencionada en la sección anterior. La modelización e implementación de las restricciones del problema en este lenguaje se puede encontrar en [1].

El comportamiento eléctrico de la red a lo largo del plan de reconfiguración propuesto es simulado con precisión mediante el uso del módulo *DISPOT* proporcionado por ENHER y escrito en lenguaje *C*.

La conexión entre los dos módulos anteriores se establece mediante el uso de *CLIC* (*C Language Interface to CHIP*).

Una base de datos actualizada proporciona la información de partida referente a la topología de la red.

El interfaz gráfico, basado en *X windows* y desarrollado mediante el módulo *XGIP* de *CHIP V4*, permite al operador tanto la selección del área de red sobre la que desea trabajar como la introducción cómoda de los datos referentes a los descargos a programar: su duración, prioridad, el tramo de línea afectado, las fechas aceptadas de inicio más temprano y final más lejano, y las cantidades de recursos que consume. Los resul-

1. *CHIP V4* es un producto de Cosytec SA, derivado del software original *CHIP* de ECRC GmbH, cuya licencia fue cedida a Cosytec por ECRC.

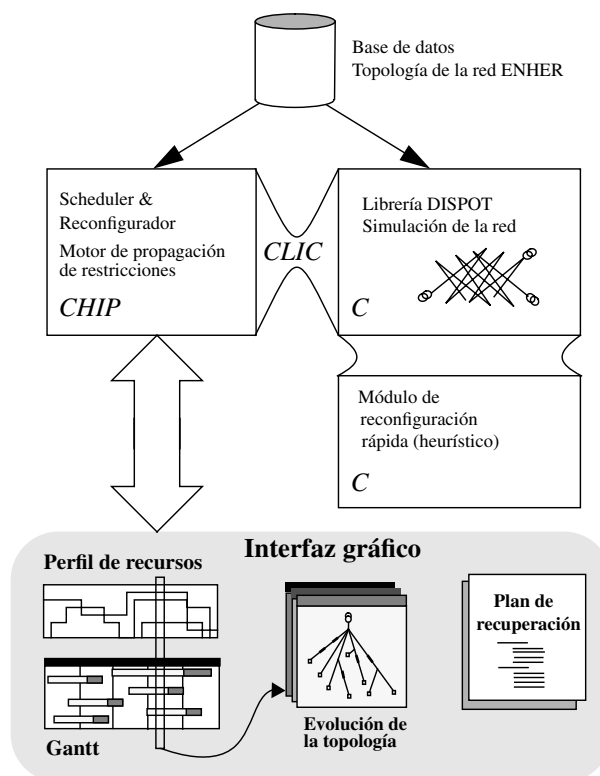


Figura 2 - Estructura de *PLANETS*.

tados de ejecución se muestran mediante un diagrama de Gantt correspondiente al calendario de descargos propuesto, junto con el perfil de recursos utilizados. Seleccionando un instante cualquiera de este diagrama, el interfaz gráfico muestra el estado de la red que *PLANETS* propone como parte del plan de reconfiguración.

En el sistema se ha incluido, además, un módulo de reconfiguración basado en el algoritmo heurístico propuesto en [5]. Este módulo permite la obtención rápida de planes de recuperación ante averías imprevistas que originen apagones de dimensiones moderadas.

El sistema actual se ejecuta sobre una estación SuperSparc20.

3. Resultados

Para un área de la red de distribución de unos 1200 tramos de línea, 400 interruptores operables y con 15 descargos a planificar, *PLANETS* necesita aproximadamente unos 3 minutos de CPU para producir un calendario y su plan de reconfiguración óptimo asociado. La mayor parte de este tiempo ($\pm 70\%$) se destina a la construcción de la red de restricciones ilustrada en la figura 1, un proceso de coste de cómputo casi lineal con el tamaño de la red. El resto del tiempo es consumido por un proceso de etiquetado y búsqueda de la solución óptima con el método *branch-and-bound*.

4. Conclusiones y extensiones futuras

En este trabajo se ha descrito un sistema para la elaboración de programas de mantenimiento óptimo y reconfiguración sobre redes eléctricas que utiliza técnicas de programación lógica por restricciones. Además de constituir una metodología natural debido al elevado número de restricciones que intervienen, estos métodos han demostrado poseer una capacidad expresiva excelente, permitiendo el desarrollo de este primer prototipo en un lapso de tiempo relativamente corto.

La facilidad con la que se implementan las restricciones deriva principalmente de la utilización de predicados PROLOG de alto nivel, lo cual permite al programador introducirlas en el sistema mediante una sintaxis declarativa que refleja directamente el enunciado de las mismas en lenguaje natural.

El prototipo actual esta siendo transportado al dispatching de ENHER y a medio plazo se prevé su integración on-line con su sistema de visualización y representación ortogonal de la red.

El sistema propuesto mejora la explotación de la red de distribución. Desde el punto de vista económico, la compañía eléctrica minimiza el coste global de ejecución del plan de mantenimiento gracias a la utilización eficiente de sus recursos finitos y a la eliminación de muchas operaciones sobre interruptores que resultan redundantes. Por otro lado, la restricción “ningún consumidor debe quedar desenergizado si existe una reconfiguración que lo evite” proporciona un beneficio extra a la compañía porque minimiza la cantidad total de energía no distribuida por descargos forzados. Finalmente, si bien la restricción “ninguna rama debe sobrepasar el umbral de intensidad permitido” no minimiza las pérdidas en las líneas, sí posibilita, en cambio, la acotación de éstas a un valor determinado.

Aunque el sistema descrito se centra en la problemática del mantenimiento y reconfiguración sobre redes de distribución de media tensión con explotación radial, la metodología utilizada es claramente extensible a cualquier otro tipo de configuración de red, ya sea ésta de alta o baja tensión, radial o mallada.

En versiones futuras de *PLANETS* se prevé mejorar su gestión de memoria. Ciertamente, en la actualidad se requiere gran cantidad de espacio de memoria para poder trabajar con redes de dimensiones realistas. Por ejemplo, para un tamaño de red como el descrito en la sección anterior, *PLANETS* utiliza unos 25 Mb de memoria para representar la red de restricciones (figura 1). Ello es debido al gran número de variables que ésta contiene: unas 22.000. Estas cantidades pueden reducirse sustancialmente si solamente se representan aquellas porciones de red que intervienen realmente en el proceso de reconfiguración.

Agradecimientos

Deseamos expresar nuestra gratitud a Manel Batlle de ORIGIN, S.A. por su valiosa ayuda en el desarrollo del interfaz con la librería de simulación eléctrica DISPOT. Asimismo, agradecemos el apoyo recibido por parte de COSYTEC a lo largo de todo el proyecto.

Referencias

- [1] Creemers, T., Ros Giralt, L., Riera, J., Ferrarons, C., Roca, J., Corbella, X., “Constraint-based Maintenance Scheduling on an Electric Power-Distribution Network”, *3th International Conference and Exhibition on Practical Applications of Prolog*, París, Francia, abril 1995.
- [2] Kowalski, R., “Predicate Logic as Programming Language”, en North Holland ed., *Proceedings of the IFIP Congress 74*, pp. 569-574, 1974.
- [3] Mackworth, A.K., “Consistency in networks of relations”, en *Artificial Intelligence*, 8, pp. 99-118, 1977.
- [4] Robinson, J.A., “A Machine-Oriented Logic Based on the Resolution Principle”, *Journal of ACM*, 12 (1):23-41, Enero 1965.
- [5] Shirmohammadi, D., “Service Restoration in Distribution Networks via Network Reconfiguration”, in *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.7, No.2, pp. 952-958, Abril 1992.
- [6] Van Hentenryck, P., “*Constraint Satisfaction in Logic Programming*”, MIT Press, 1989.